

УДК 622.23:539.194

Г.П. Стариков¹, В.В. Завражин¹, О.Г. Худолей¹, Д.В. Мельников¹,
Хуанган Нурбол²

ГЕОФИЛЬТРАЦИОННАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ РАЗГРУЗКИ ПРИЗАБОЙНОЙ ЧАСТИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

¹ИФГП НАН Украины

²Карагандинский государственный технический университет, Казахстан

В работе обоснована принципиальная возможность оценки напряженного состояния и глубины зоны отжима и разгрузки призабойной части пластов на основе учета закономерностей изменения проницаемости в зависимости от условий деформирования угольных образцов в лабораторных условиях и параметров фильтрационной составляющей эффективной диффузии, измеренных в натуральных условиях

Ключевые слова: добыча угля, выброс угля и газа, анализ, зона неупругих деформаций, зона разгрузки, диффузия, проницаемость, фильтрация

При переходе горных работ в область больших глубин (существенно ниже зоны газового выветривания) значительно изменяются внешние и внутренние относительно угольного пласта факторы, обуславливающие возникновение газодинамических явлений (ГДЯ).

Анализ расчетных и экспериментальных данных показывает, что концентрация напряжений в призабойной части пласта инициирует образование зон предельного состояния пород, где проявляются упругие и пластические деформации в условиях неравнокомпонентного объемно-напряженного состояния [1–4]. В этой части пласта упругие характеристики вмещающих пород на порядок и более превосходят запредельные характеристики угольного пласта, что обуславливает формирование зоны неупругих деформаций в краевой части пласта [4] (рис. 1).

На основании многочисленных теоретических исследований и экспериментальных данных в призабойной части пласта можно выделить три характерных участка различного объемного нагружения и геомеханического состояния (рис. 1).

I участок объемного нагружения угольного пласта в глубине массива вне зоны влияния выработки характеризуется тем, что три главных напряжения связаны соотношениями $\sigma_1 = p_1 < 0$, $\sigma_2 = \sigma_3 = \lambda p_1$, где p_1 — величина

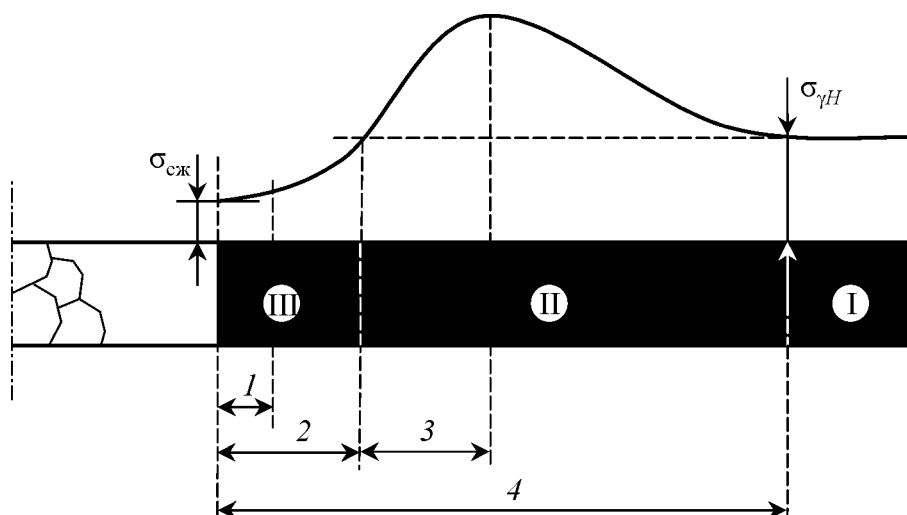


Рис. 1. Распределение напряжений в краевой части пласта: 1 – глубина отжима, 2 – зона разгрузки, 3 – зона разрушения угля (предельное состояние), 4 – зона опорного давления

максимального сжимающего напряжения на пласт в зоне «нетронутого» массива; λ – коэффициент бокового распора. При этом используется гипотеза о геостатическом напряженном состоянии, реализующемся в зоне «нетронутого» массива. В соответствии с полученными соотношениями между главными напряжениями параметр Надаи–Лоде равен -1 , что свидетельствует о виде объемного напряженного состояния обобщенного сжатия для этой зоны нагружения.

II участок объемного нагружения угольного пласта в глубине массива, где начинается частичное разрушение и сжимающие напряжения σ_1 , σ_2 и σ_3 достигают своих наибольших значений, характеризуется тем, что максимальное сжимающее напряжение σ_1 достигает значения $K_k p_1$ (где K_k – концентратор напряжения), минимальное сжимающее напряжение изменяется в пределах от $\lambda p_{3л}$ до p_3 , а промежуточное главное напряжение σ_2 достигает полусуммы σ_1 и σ_3 . Величина μ_σ значительно отличается от единицы и приближается к нулю. Это свидетельствует о том, что на данном участке нагружения угольного пласта вид напряженного состояния близок к обобщенному сдвигу.

III участком объемного нагружения угольного пласта является часть забоя, где минимальное сжимающее напряжение стремится к нулю, а соотношение между двумя другими главными напряжениями зависит от условий разрушения угольного пласта на участке между второй и третьей зонами нагружения. Для угольных пластов максимальное сжимающее напряжение σ_1 на кромке забоя в отдельных случаях может снижаться до уровня промежуточного главного напряжения σ_2 , что свидетельствует о реализации обобщенного растяжения.

Необходимо отметить, что разрушение и разупрочнение краевой части угольного пласта происходят при разгрузке вследствие выемки очередной

полоски угля в лаве. Разрушение твердого тела не при увеличении или длительном воздействии нормальных либо касательных напряжений, а при разгрузке было отмечено еще в 40–50-х гг. прошлого столетия американским ученым П. Бриджменом [5, 6].

Теоретическими положениями, аналитическими расчетами и многочисленными экспериментальными исследованиями была доказана принципиальная невозможность зарождения и возникновения ГДЯ в зоне разгрузки. Положения о невыбросоопасности разгруженной краевой части выбросоопасного пласта легли в основу многих способов прогноза, предотвращения ГДЯ и контроля их эффективности, которые вошли в новый стандарт Минуглепрома Украины [7].

Реальные значения параметров зоны разгрузки (ее величина и соответствующие ей напряжения) могут быть установлены непосредственно в процессе проведения шахтных экспериментов.

На сегодняшний день в соответствующем нормативном документе [7] рекомендовано определять величину зоны разгрузки призабойной части пласта двумя способами: по динамике начальной скорости газовыделения и по параметрам акустического сигнала при поинтервальном бурении контрольных шпуров.

При использовании первого способа измерение начальной скорости газовыделения производится через каждые 0,5 м по длине контрольного шпура. При достижении 1 м, а затем через каждые 0,5 м бурение прекращают, буровую штангу извлекают, в контрольный шпур вводят газовый затвор ЗГ-1 или ГШМ и герметизируют измерительную камеру длиной 0,2 м. С помощью расходомера газа ПГ-2МА, присоединенного к газозатвору, не позднее чем через 3 мин измеряют начальную скорость газовыделения g . По результатам поинтервальных измерений газовыделения разгруженной зоной пласта считается его призабойная часть до конца интервала, на котором увеличение начальной скорости газовыделения сменяется уменьшением (если она по абсолютной величине не менее 0,8 л/мин). При максимальной скорости газовыделения до 0,8 л/мин величину зоны разгрузки считают равной длине шпура плюс 1 м. Если скорость газовыделения равна или превышает 0,8 л/мин и не происходит ее снижение, то величину зоны разгрузки принимают равной длине шпура плюс 0,5 м.

Данный способ достаточно прост в использовании, однако, не вдаваясь в физическую сущность динамики газовыделения в призабойной части пласта, следует отметить некоторые недостатки этого способа, существенно влияющие на достоверность и точность получаемых результатов.

Разработанный сотрудниками МакНИИ в начале 60-х гг. прошлого века газовый затвор ЗГ-1 имеет длину 3,2 м. Длина затвора обосновывалась исходя из анализа размеров полостей выбросов, значительное большинство которых развивалось на глубине 3–4 м. К длине газового затвора привязывается и количество необходимых интервалов замеров. При ведении горных ра-

бот на современных глубинах разработки (1200 м и более) размеры зоны разгрузки могут не соответствовать заложенным в способе технологическим параметрам.

Несовершенство конструкции газозатора, заключающееся в возможности попадания штыба угля в трубку из измерительной камеры, привело к ошибке прогноза, повлекшей травматизм людей на шахте им. Бажанова в 1979 г. [8].

Много нареканий со стороны производственников и исследователей относится к возможности качественной герметизации шпура в момент проведения замеров [9]. Сотрудники МакНИИ, занимавшиеся разработкой и внедрением способа оценки выбросоопасных зон, отмечали, что с увеличением глубины ведения горных работ стенки контрольных шпуров будут разрушаться настолько, что надежно герметизировать измерительную камеру будет невозможно. Данное обстоятельство неоднократно имело место и в настоящее время, например, при проведении натуральных измерений в шахтах «Щегловская-Глубокая» и №22 «Коммунарская» ПАО ш/у «Донбасс», разрабатывающих пласты на глубинах более 1000 м.

В свете современных представлений о фазовом состоянии метана в угольном массиве необходимо учитывать и тот факт, что более 60% метана находится в закрытых порах, процесс десорбции из которых может составлять десятки часов. В этом случае способ газодинамики покажет неопасную ситуацию, хотя на самом деле участок выемки будет характеризоваться как достаточно активный с газодинамической точки зрения.

Также необходимо отметить следующее обстоятельство, относящееся к физической модели способа газодинамики. При уменьшении скорости сорбционных процессов в случаях дифференциации распределения давлений газа и особенно при режиме фильтрации, характеризующемся постоянным газосодержанием в угольных блоках, становится возможным сохранить высокую метаносность угля на кромке забоя, несмотря на повышенную газопроницаемость пласта в отжатой зоне [10]. Данное явление широко известно в практике и ранее толковалось неоднозначно. Однако на сегодняшний день оно получило свое экспериментальное подтверждение, что ставит под сомнение абсолютную достоверность данных о распределении газа в призабойной части пласта, полученных с помощью способа газодинамики.

При определении величины зоны разгрузки по параметрам акустического сигнала также не исключаются ошибки первого рода. Регистрацию и обработку акустических сигналов на каждом интервале бурения осуществляют с помощью аппаратуры АПСС и компьютера по специальной программе. В подземном блоке АПСС предусмотрен специальный сейсмоприемник, который устанавливается на расстоянии 3–10 м от контрольного шпура. Наличие такой сложной системы (поверхностный блок, подземная часть, компьютерная программа) уже предопределяет большее количество вероятности отказа в процессе съема данных, их передачи и обработки. Сам процесс бурения

контрольных скважин не может происходить в одинаковом режиме (по времени и интенсивности) во всех интервалах бурения контрольных шпуров. Объясняется это в первую очередь влиянием человеческого фактора на процесс бурения, тем более, что оно производится ручными сверлами типа СЭР. Кроме того, на точность и достоверность измеряемых показателей акустического сигнала влияют такие факторы, как затупление буровых коронок по мере бурения шпуров, другие источники акустических сигналов (установка крепи, работа отбойных молотков и т.д.). Стоимость аппаратуры и сложность ее обслуживания также являются сдерживающими факторами для широкого применения данного способа в промышленности.

Целью настоящей работы является обоснование нового методического подхода к оценке величины зоны разгрузки в краевой части угольного пласта, основанного на учете закономерностей изменения проницаемости угля в условиях объемного неравнокомпонентного нагружения и параметров фильтрационной составляющей эффективной диффузии по длине контрольной скважины (шпура).

В ходе проведения исследований на установке неравнокомпонентного трехосного сжатия учеными ИФГП было установлено существенное влияние вида напряженного состояния на физико-механические свойства углей, в том числе и на изменение их фильтрационных показателей [11]. Целью экспериментальных исследований было установление характера изменения газопроницаемости угля в условиях, приближенных к условиям сжатия в нетронутым массиве и призабойной части угольного пласта на глубинах разработки 800–1000 м.

Анализируя результаты отмеченных исследований, можно сделать вывод о существовании тесной взаимосвязи между характером и величиной напряжений и фильтрационными характеристиками угля в призабойной части пласта.

Одними из определяющих факторов (при прочих равных условиях), характеризующих фильтрацию метана в призабойной части угольных пластов, являются коэффициент проницаемости и эффективный коэффициент массопереноса.

Проницаемость характеризует проводимость массива, т.е. способность пород пласта пропускать жидкость и газ. Принято различать абсолютную, фазовую и относительную проницаемость. В условиях призабойной части угольного пласта чаще всего имеет место абсолютная проницаемость – проницаемость пористой среды, заполненной лишь одной фазой, инертной к этой среде. Проницаемость определяется размерами и структурой поровых каналов, но не зависит от насыщающего флюида, т.е. характеризует физические свойства породы.

По аналогии с работой [12], сравнивая формально законы Дарси и Фика, на основе которых получены уравнения фильтрации и диффузии, можно коэффициенту эффективной диффузии (фильтрационная составляющая) по-

ставить в соответствие некоторый эквивалентный по скорости газовыделения коэффициент проницаемости, имеющий ту же размерность, что и нормальный коэффициент диффузии:

$$D_{\text{эф}} = \frac{k}{\mu} P_{\text{эф}}. \quad (1)$$

Следует отметить, что оба способа описания процесса движения газа (уравнением фильтрации или диффузии) являются приближенными, поскольку в столь неоднородной среде миграция происходит одновременно по различным законам [13].

Как было отмечено ранее [11], в исследованиях была установлена зависимость коэффициента проницаемости от действующих напряжений. Зависимость эта имеет экспоненциальный вид. На рис.2 показан пример разложения зависимости $k = f(\sigma)$, где

$$k = k_0 \cdot e^{\left(-\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)}. \quad (2)$$

Здесь k_0 и σ_0 – константы для исследуемых образцов угля с выходом летучих $V^{\text{daf}} = 8.9\%$ для условий пласта h_{11} «Безымянный», горизонт 790 м: $k_0 = 2,39 \cdot 10^{-6}$, $\sigma_0 = 6,7$ МПа.

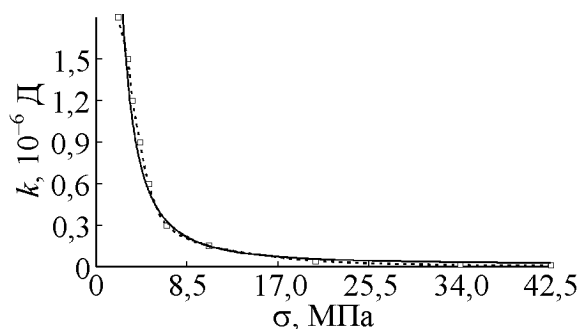


Рис. 2. Пример разложения зависимости коэффициента газопроницаемости k от действующих напряжений $\sigma_{\text{ср}}$

Используя данный подход и определяя проницаемость угольного пласта в каждой конкретной точке массива, можно рассчитать соответствующие напряжения по формуле

$$\sigma = \sigma_0 \ln \frac{k_0}{k}. \quad (3)$$

Одной из проблем данного подхода, да и вообще вопросов определения фильтрационных характеристик массива угля, является расчет коэффициента проницаемости в шахтных условиях. Для решения этой проблемы в ИФГП НАН Украины был разработан и прошел шахтную проверку измеритель массопереноса метана в угле ДС-03 (ШИММ), позволяющий определять эффективный коэффициент массопереноса метана, давление и количества газа в месте отбора проб.

Для данной методики полученный эффективный коэффициент массопереноса раскладывается на две составляющие – диффузионную и фильтрационную. Для расчета по формуле (3) используется фильтрационная составляющая (рис. 3).

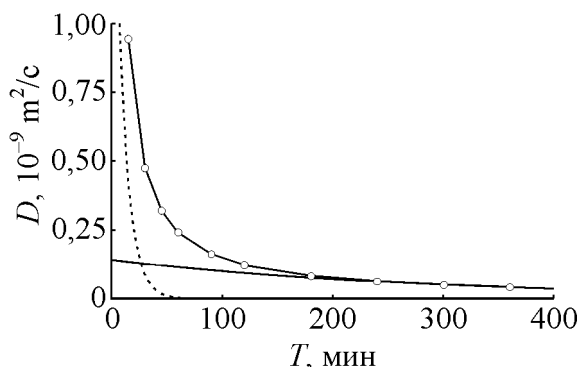


Рис. 3. Пример разложения эффективного коэффициента массопереноса (—○—) на фильтрационную (-----) и диффузионную (—) составляющие для условий пласта k_3 шахты им. А.Ф. Засядько

Тогда выражение (3) с использованием (1) имеет вид

$$\sigma = \sigma_0 \ln \frac{k_0 P_{\text{пл}}}{D_f \mu}, \quad (6)$$

где $P_{\text{пл}}$ – пластовое давление газа, МПа.

При использовании описанного методического подхода процесс оценки основных параметров зоны разгрузки краевой части пласта основывается на учете не всех влияющих факторов (отдельные из которых при увеличении глубины работ определить практически невозможно), а только конечных результатов их влияния, т.е. физико-механического состояния призабойной части пласта. Отобрав пробы для определения параметров десорбции с разной глубины призабойной зоны, можно в оперативном режиме произвести оценку уровня напряжений в пласте.

Проверку функциональности и достоверности предлагаемой методики проводили для горно-геологических условий при отработке лав на пластах: k_3 «Колпаковский» шахты №22 «Коммунарская», l'_8 шахты «Щегловская-Глубокая» ш/у «Донбасс» и h'_6 – «Смоляниновский» шахты им. А.А. Скочинского. Во время бурения скважин отбирали пробы угля по глубине, рассеивали на две фракции 0,4–0,5 и 1,0–1,6 мм. Измерения кинетики десорбции метана проводили с использованием прибора ДС-03 (ШИММ). Результаты определения $\sigma_{\text{ср}}$ с использованием формулы (3) представлены в таблице.

Для условий шахты «Щегловская-Глубокая» по пласту l'_8 установлено, что в пределах 1,5–3 м уровень напряжений меньше величины горного давления в нетронутом массиве (γH) в 1,2–2,4 раза. Эти значения получены для условий отхода лавы от разрезной печи на расстояние более 500 м.

Для условий пласта h'_6 «Смоляниновский» шахты им. А.А. Скочинского, работы по которому ведутся в режиме сотрясательного взрывания, степень снижения горного давления в призабойной части (нижняя ниша 2-й западной лавы) до глубины 2,5–3,0 м составила в среднем более 200%.

Таблица

Результаты определения $\sigma_{ср}$

Глубина скважины, м	$D_d \cdot 10^{-8}$	$D_f \cdot 10^{-6} с$	$\sigma_{ср}$	P	$\sigma_{гН}$
	м ² /с		МПа		
Пласт l_8 шахты «Щегловская-Глубокая»					
1,5	0,428	25,5	10,5	0,54	25,5
3,0	0,774	28,2	21,4	2,97	-
5,0	0,591	8,3	32,5	4,86	-
Пласт h_6^1 «Смоляниновский» шахты им. А.А. Скочинского					
1	0,325	32,6	6,5	0,5	32,5
2	0,298	40,2	9,8	0,8	-
4	0,339	2,5	31,2	1,4	-
Пласт k_3 «Колпаковский» шахты №22 «Коммунарская»					
1	0,701	3,26	21,1	6,0	18,5
2	0,604	2,42	17,7	2,03	-
4	0,685	3,05	17,5	2,42	-

Анализ полученных результатов для условий пласта k_3 «Колпаковский» на шахте №22 «Коммунарская» показывает, что на глубине 1 м величина горного давления не снизилась, как для условий предыдущих пластов, а возросла в среднем в 1,4 раза. Это связано в первую очередь с незначительным (6 м) отходом лавы от разрезной печи и с отсутствием зоны разгрузки, которая формируется вследствие зависания пород основной кровли.

Использование данного методического подхода в качестве инструмента оценки параметров глубины зоны разгрузки требует разработки соответствующих фильтрационных паспортов для каждого конкретного угольного пласта в виде зависимости коэффициента проницаемости от уровня предельного и за-предельного напряженного состояния. Эта информация послужит основой для определения параметров зон отжима и разгрузки в краевой части угольного массива применительно к очистным и подготовительным забоям (см. рис. 1).

Выводы

Впервые установлено, что с использованием закономерностей изменения проницаемости в зависимости от условий деформирования угольных образцов в лабораторных условиях и параметров фильтрационной составляющей эффективной диффузии, измеренных в натуральных условиях, можно с высокой вероятностью оценивать напряженное состояние и глубину зон отжима и разгрузки в призабойной части угольных пластов. С помощью данного методического подхода для трех различных угольных пластов, обрабатываемых в разных горно-геологических и горнотехнических условиях, была произведена оценка параметров зоны разгрузки. Результаты этой оценки свидетельствуют о достаточной достоверности полученных результатов и о возможности использования данного подхода в качестве нового способа определения параметров зон отжима и разгрузки для условий очистных и подготовительных забоев.

1. *Баренблатт Г.И.* Об обрушении кровли при горных выработках / Г.И. Баренблатт, С.А. Христианович // Изв. АН СССР. Отд-ние техн. наук. – 1955. – №11. – С. 73–86.
2. *Хапилова Н.С.* Теория внезапного отжима угольного пласта / Н.С. Хапилова. – К.: Наукова думка, 1992. – 232 с.
3. *Алексеев А.Д.* Прогнозирование неустойчивости системы уголь–газ / А.Д. Алексеев, Г.П. Стариков, В.Н. Чистоклетов. – Донецк: Изд-во «Ноулидж» (Донецкое отделение), 2010. – 343 с.
4. *Петухов И.М.* Механика горных ударов и выбросов / И.М. Петухов, А.М. Линьков. – М.: Недра, 1983. – 280 с.
5. *Бриджмен П.В.* Исследования больших пластических деформаций и разрыва / П.В. Бриджмен. – М.: Изд-во иностр. лит., 1955. – 440 с.
6. *Бузер Г.Д.* Влияние поровой жидкости на деформационное поведение горных пород при трехосном сжатии / Г.Д. Бузер, К.Х. Хиллер, С. Серденгекти // Механика горных пород. – М., 1996. – С. 372–406.
7. *СОУ 10.1.00174088.011 – 2005.* Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ // Стандарт Мінвуглепрому України. – Макіївка: МакНДІ, 2006. – 225 с.
8. *Николин В.И.* Прогнозирование и устранение выбросоопасности при разработке угольных месторождений / В.И.Николин, М.П.Васильчук. – Липецк: Липецкое издательство Роскомпечати, 1997. – 496 с.
9. *Ольховиченко А.Е.* Прогноз выбросоопасности в глубоких шахтах Донбасса / А.Е. Ольховиченко, Я.Н. Бойко, С.А. Зеленский // Безопасность труда в промышленности. – 1981. – №1. – С.45–46.
10. *Петухов И.М.* Расчетные методы в механике горных ударов и выбросов / И.М. Петухов, А.М. Линьков, В.С. Сидоров // Справочное пособие. – М.: Недра, 1992. – 256 с.
11. *Алексеев А.Д.* Изменение трещиновато-пористой структуры и газопроницаемости угля в условиях неравномерного объемного сжатия / А.Д. Алексеев, Н.В. Недодаев, Г.П. Стариков // Научн. сообщ. ИГД им. А.А. Скочинского. – М., 1990. – С. 19–23.
12. *Коган Г.Л.* О модели пористой структуры ископаемых углей / Г.Л. Коган, М.Ф. Яновская // Химия твердого топлива. – 1968. – №5. – С.26–32.
13. *Тимофеев Д.П.* Кинетика адсорбции / Д.П. Тимофеев. – М.: Из-во АН СССР, 1962.

Г.П. Стариков, В.В. Завражин, О.Г. Худолей, Д.В. Мельников, Хуанган Нурбол

ГЕОФІЛЬТРАЦІЙНА ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ ЗОНИ РОЗВАНТАЖЕННЯ ПРИВІБІЙНОЇ ЧАСТИНИ ВУГІЛЬНИХ ПЛАСТІВ

У роботі обґрунтовано принципову можливість оцінки напруженого стану й глибини зони віджимання та розвантаження привібійної частини пластів на основі обліку закономірностей зміни проникності залежно від умов деформації вугільних зразків у лабораторних умовах і параметрів фільтраційної складової ефективної дифузії, виміряних в натурних умовах.

Ключові слова: видобуток вугілля, викид вугілля й газу, аналіз, зона непружних деформацій, розвантажена зона, дифузія, проникність, фільтрація

G.P.Starikov, V.V.Zavrashin, O.G.Hydoley, D.V.Melnikov, Hyangan Nyrbol

GEOFILTRATIONAL ASSESSMENT PARAMETERS UNLOADING AREA BOTTOM-HOLE OF COAL SEAMS

Fundamental possibility of estimation of the tense state and depth of zone of quench and unloading of to regional part of layers is in-process reasonable on the basis of account of conformities to law of change of permeability from the terms of deformation of coal standards in laboratory terms and parameters of lauter constituent of effective diffusion, measured in model terms

Keywords: coal mining, surge of coal and gas, analysis, studies, elastic deformation zone, unloaded zones, diffusion, permeability, filtration